

1. 地震時の急傾斜地崩壊危険箇所危険度評価

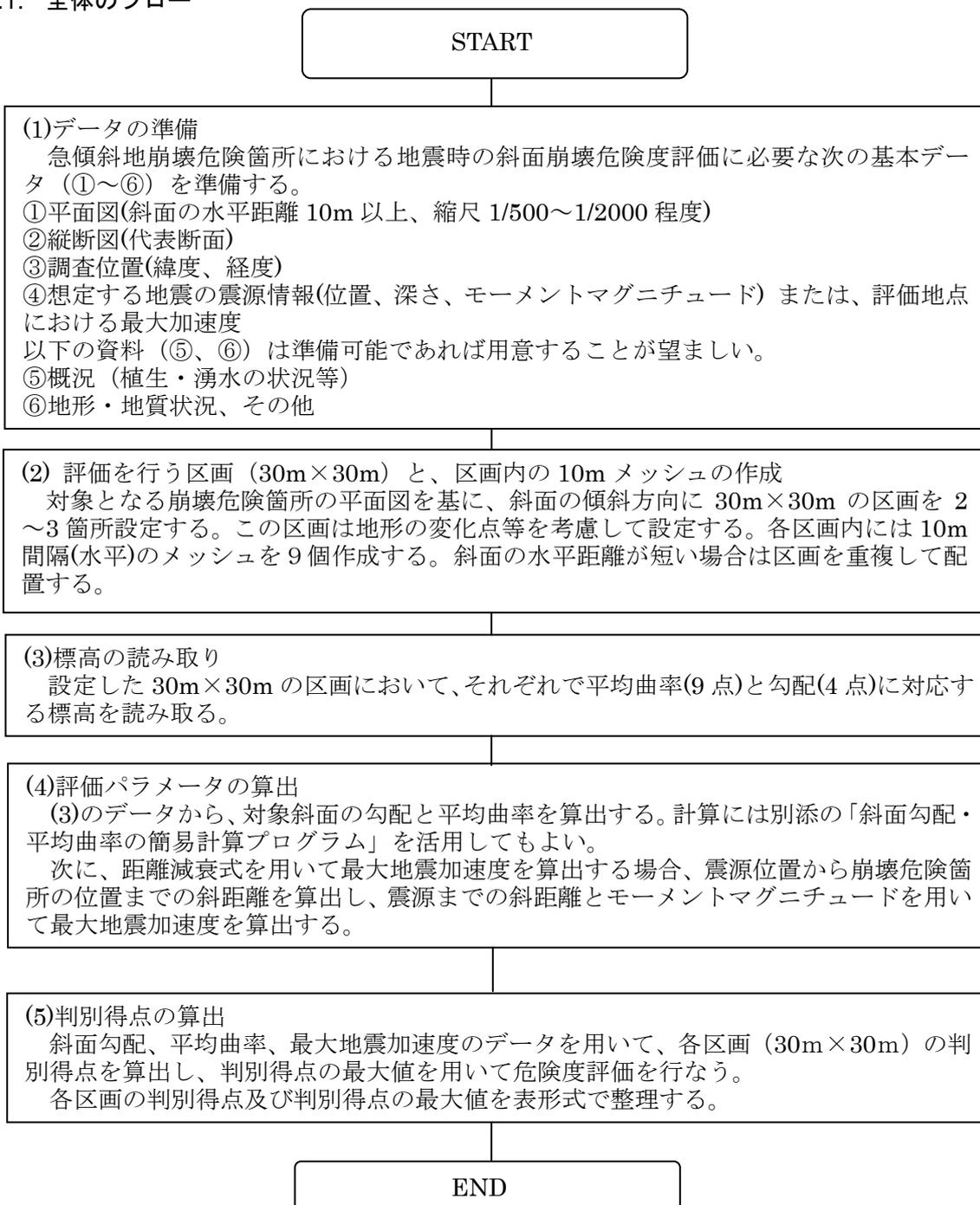
1.1. 評価を行う上での基本事項

本マニュアルは、急傾斜地崩壊危険箇所における斜面の勾配、平均曲率の地形要素と、想定される地震加速度のデータを用いて、地震時の斜面崩壊危険度を評価する場合に適用する。なお、判定方法は 10mメッシュレベルの地形データを用いるため、対象とする斜面は縦断および横断方向に 10m以上（水平）の大きさを有する箇所とする。

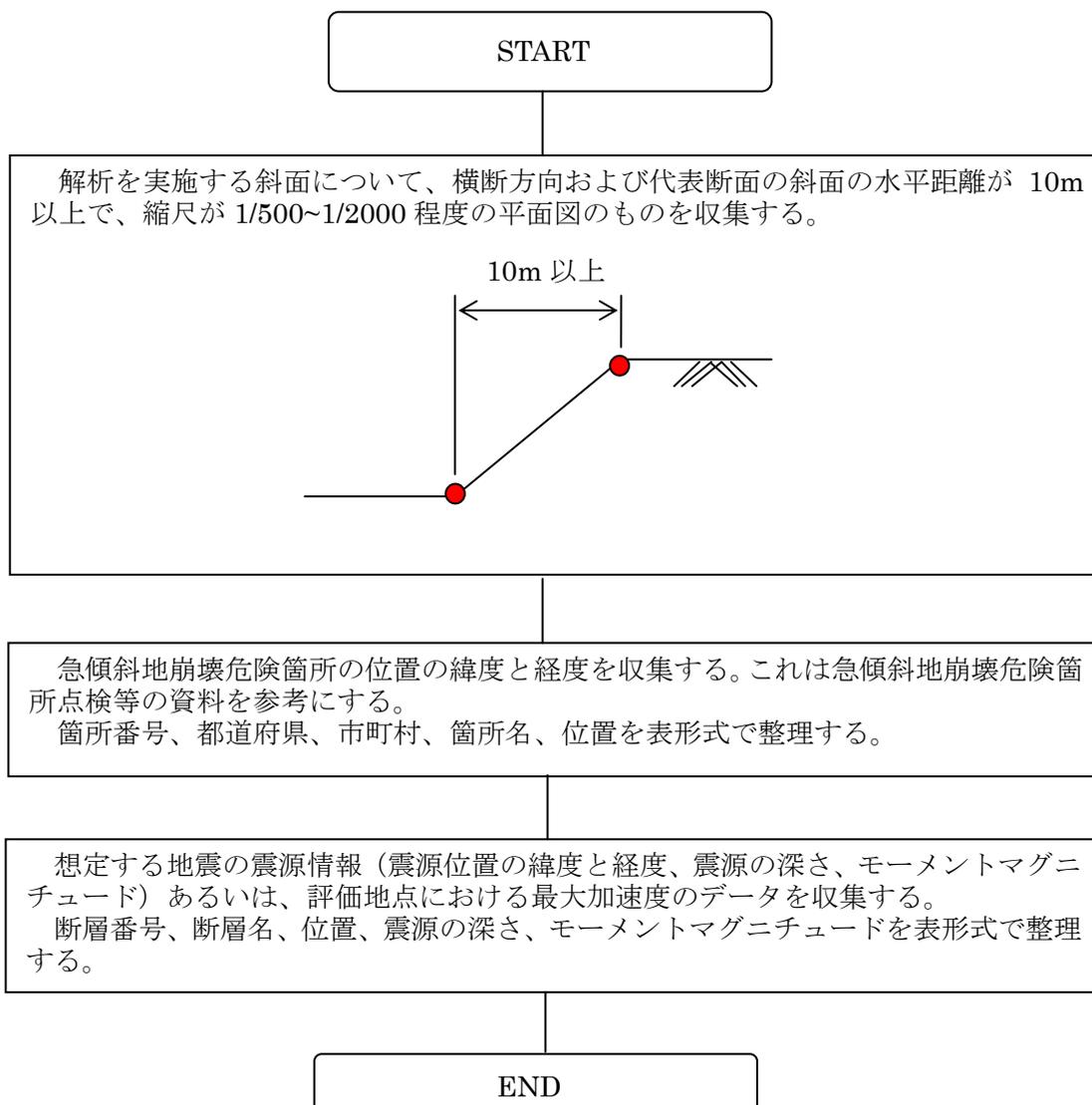
1.2. 危険度評価作業のフロー

危険度評価作業のフローは、次のとおりである。

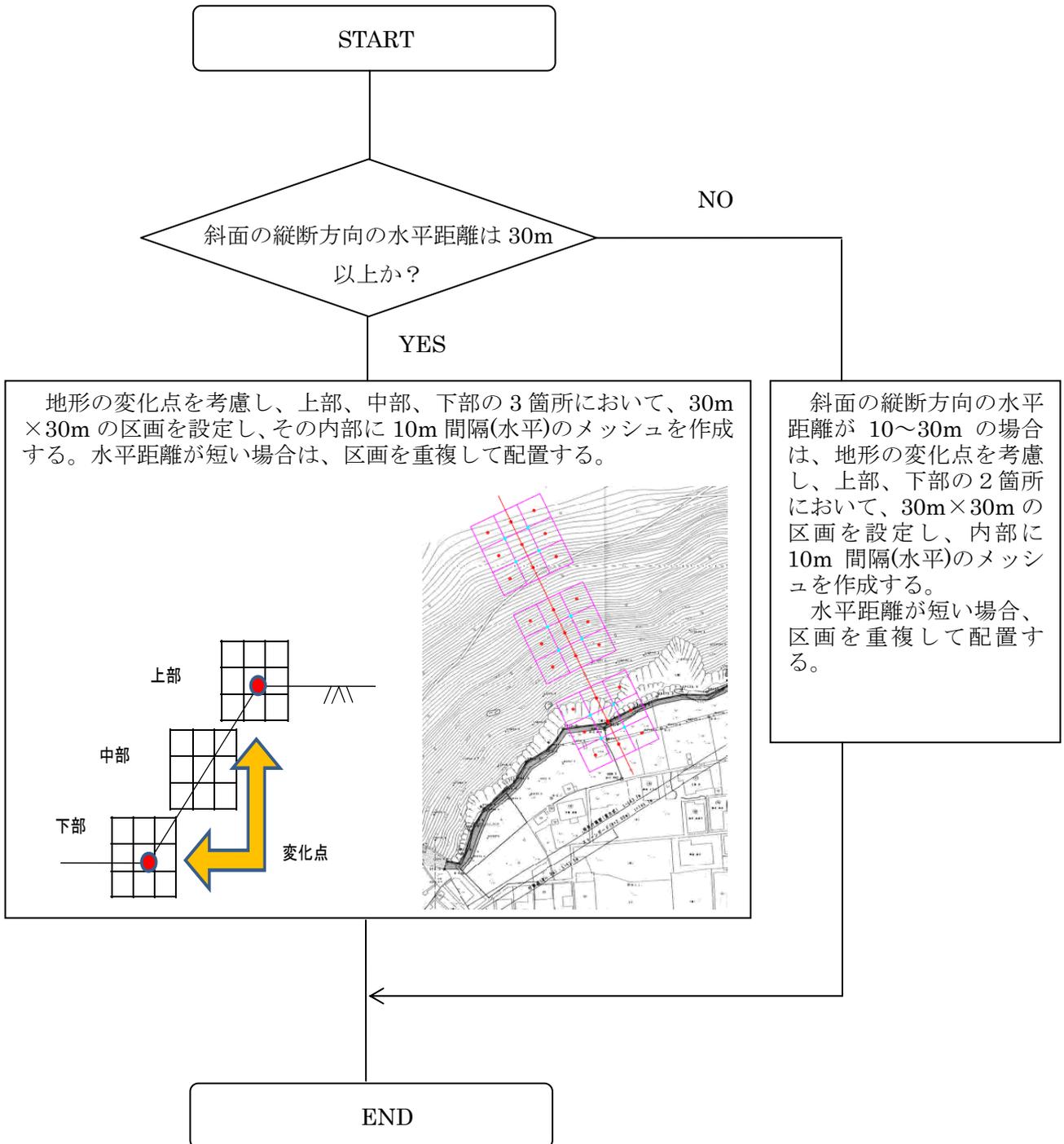
1.2.1. 全体のフロー



1.2.2. データ準備のフロー



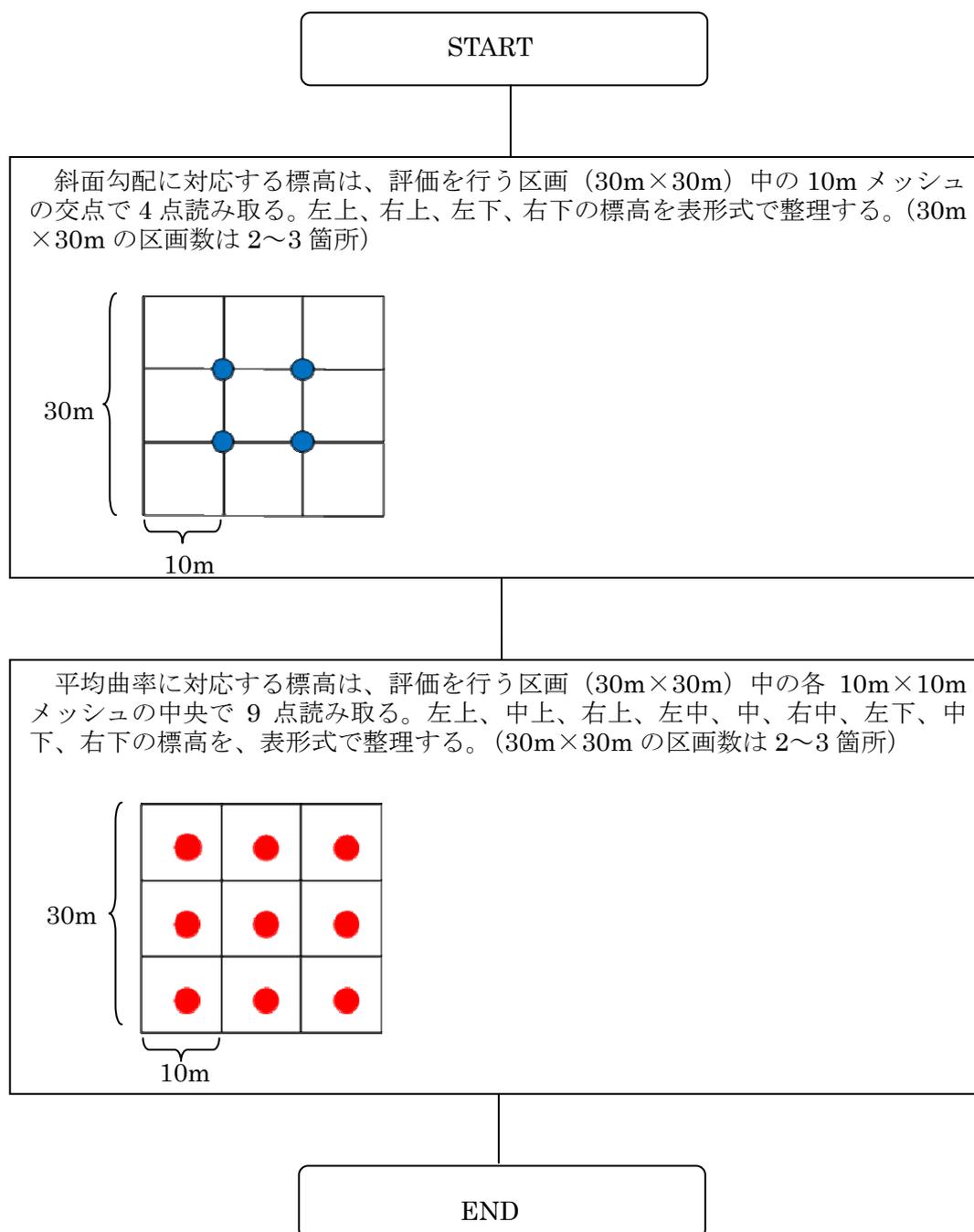
1.2.3. 計算に必要なメッシュ作成フロー



※評価を行う区画 (30m×30m) 作成の留意点

- ①区画の中心が指定区域内に入るように作成する。
- ②区画の中心が地形の変化点と重なるように作成する。
- ③区画の中心線が等高線と直交するように作成する。
- ④急勾配となる位置で区画を作成する。

1.2.4. 標高の読み取りフロー



1.2.5. 評価パラメータの算出フロー

START

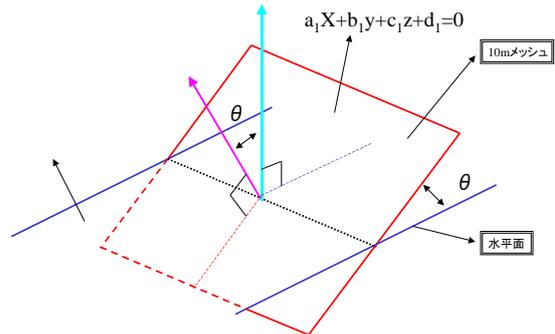
① 斜面勾配の計算

1.2.4 で読み取った 4 点からの距離が最小となる平面を決定し、それと水平面がなす角を斜面勾配 θ として算出する。上記平面の方程式を(1)式、水平面の方程式を(2)式とすると、それら 2 つの平面がなす角が斜面勾配となり、斜面勾配は(3)式で表される。

$$a_1x + b_1y + c_1z + d = 0 \quad (1)$$

$$a_2x + b_2y + c_2z + d = 0 \quad (2)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{a_1a_2 + b_1b_2 + c_1c_2}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)}} \quad (3)$$



② 平均曲率の計算

平均曲率は地形の凹凸を表す指標であり、曲面上のある点を通るすべての測地線（曲面上で 2 点間を結ぶ最短距離の曲線）の曲率の最大値と最小値の平均値である。これは、1.2.4 で読み取った 9 点の標高データと平面座標データを用いて、下記の偏微分方程式により平均曲率 H を算出する。

$$H = \frac{h_{xx}(1+h_y^2) + h_{yy}(1+h_x^2) - 2h_xh_yh_{xy}}{2(1+h_x^2+h_y^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$h_x = \frac{\partial h}{\partial x}$$

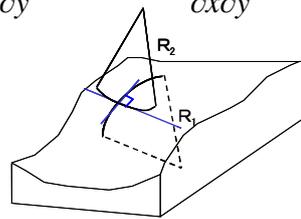
$$h_y = \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$h_{xx} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

$$h_{yy} = \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$$

$$h_{xy} = \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y}$$

ここに、 H : 平均曲率
 h : 標高
 R : 曲率半径
 K : 曲率
 である。



$$K_1 = 1/R_1$$

$$K_2 = 1/R_2$$



$$K_1 < 0$$

$$K_2 < 0$$

$$H < 0$$



$$K_1 < 0$$

$$K_2 > 0$$

$$H \approx 0$$



$$K_1 > 0$$

$$K_2 < 0$$

$$H \approx 0$$



$$K_1 > 0$$

$$K_2 > 0$$

$$H > 0$$

(続く)

(続き)

①、②の計算は区画毎の計算となるが、標高データを作成した後、別添の「斜面勾配・平均曲率の計算プログラム」を活用して計算してもよい。

③最大地震加速度算定のための距離の計算

想定地震の最大加速度の設定については、次の3通りが考えられる。

(1)震源が点

(2)震源が面 (断層面)

(3)(1)あるいは(2)を想定して、別途算出してある最大加速度のデータ等

なお、(2)については国土技術政策総合研究所資料第204号「地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究(平成16年11月)」を参考とする。(3)については、想定地震の加速度がメッシュ単位(1km×1km等)などで既に算定されている場合は、対象とする斜面の最大加速度値を適宜設定し加速度値として利用する。ここでは、(1)の点震源を想定した方法について示す。

まず、震源位置から崩壊危険箇所の位置までの斜距離 R を算出する。

$$R = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 + d^2}$$

ここに、 R : 震源位置から崩壊危険箇所の位置までの斜距離

x_1, y_1, z_1 : 崩壊危険箇所の位置の座標 x_2, y_2, z_2 : 震源位置の座標

d : 震源の深さ

④距離減衰式による最大地震加速度の計算

福島美光(2002)の距離減衰式および地盤補正により最大地震加速度 A を算出する。

$$\log_{10} A_{org} = 0.42 M_w - \log_{10} (R + 0.025 \cdot 10^{0.42 M_w}) - 0.0033 R + 1.22$$

ここに、 A : 地震加速度 (cm/s²)

R : ③で求めた震源位置から崩壊危険箇所の位置までの斜距離 (km)

M_w : モーメントマグニチュード

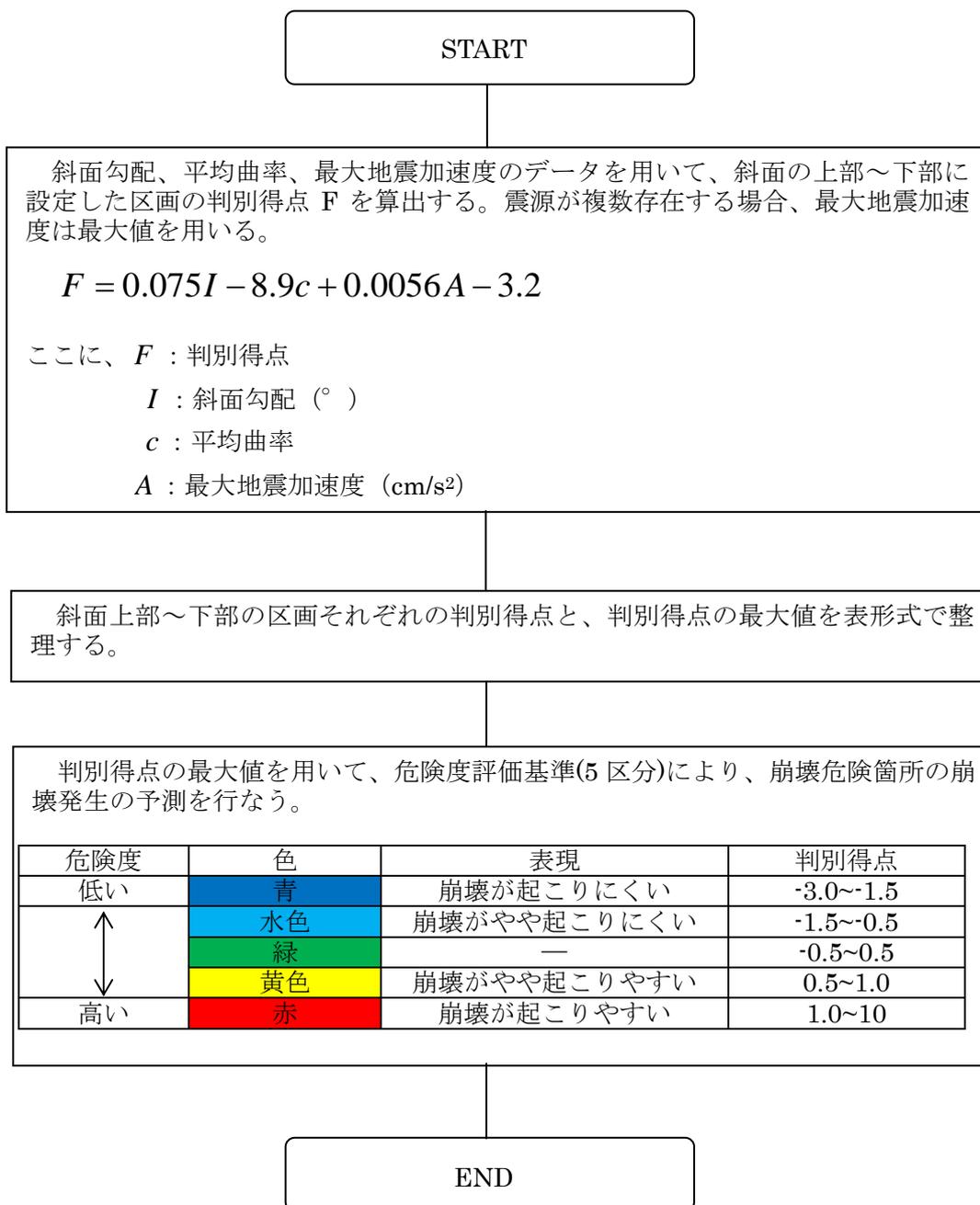
C : 地盤補正係数

距離減衰式による加速度は、工学的基盤 (S波速度 400m/sec) の値であり、加速度は地盤によって増幅、減衰するため、補正係数を乗じる。福島(2002)によれば、岩盤で 0.6、洪積層で 0.9 であり、軟弱地盤では大きくなる。平野部斜面崩壊は山地や丘陵の斜面の表層土が崩壊するが、このような場所での加速度設定は一般に困難であるため、「地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究(平成16年11月)」では $C=0.6$ としている。

以上で求めた斜面勾配、平均曲率、斜距離、最大地震加速度を表形式で整理する。

END

1.2.6. 判別得点の算出フロー



1.2.7. 判別得点の評価について

判別得点については、得点が正方向に大きいほど崩壊が起こりやすいと予測し、得点が負方向に小さいほど崩壊が起こりにくいと評価するが、これは相対的な評価方法であることから、対象とする範囲や評価を行った危険箇所における判別得点の上下限値を参考に危険度を評価する。

過去に発生した地震（兵庫県南部地震）で作成した判別得点式を用いて、兵庫県南部地震、神津島地震、宮城県北部地震、鹿児島県北西部地震、新潟県中越地震における判別得点と、各地震によって発生した崩壊の発生率との傾向について図 1.1 に示す。ここでは、崩壊発生率は、地震によって影響を受けた一定の範囲において、各判別得点の範囲にある 10mメッシュの全数に対する崩壊した範囲の 10mメッシュ数で評価している。

一方、本マニュアルでは、急傾斜地崩壊危険箇所ごとに危険度を評価（判別得点を算定）することになるが、図 1.1 の評価結果については、危険箇所の有無に関わらず、地震によって影響を受けた一定の範囲全てを 10mメッシュで分割し、メッシュごとに判別得点を算定するとともに、崩壊の有無を整理しているため、分析方法が一部異なっている（図 1.1 では崩壊発生率は低めにでる）ことに注意が必要である。

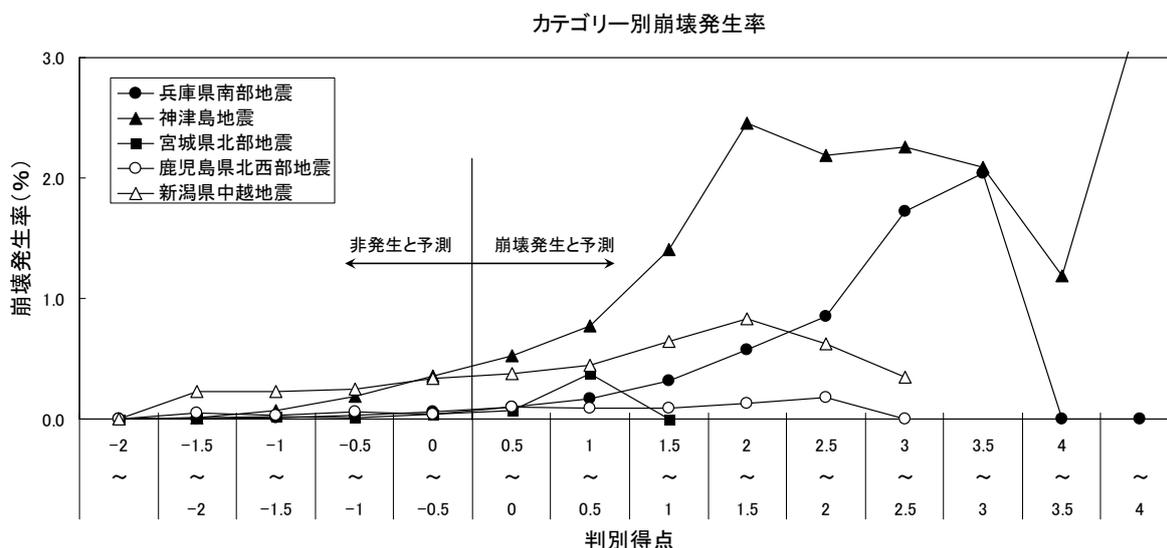


図 1.1 過去の地震による崩壊と判別得点の関係(兵庫県南部地震で作成した判別得点式

10mメッシュ数での評価)

なお、以下に兵庫県南部地震により斜面崩壊が発生した六甲山系を対象に、地震による実崩壊データ及び急傾斜地崩壊危険箇所のポリゴンデータを使用した斜面崩壊危険度評価の結果を示す。図 1.2 は六甲山系全体の判別得点頻度分布についてのグラフである。ここでは、崩壊メッシュの数え方について比較を行うために、評価対象のメッシュは傾斜角が 10 度以上のメッシュとし、崩壊メッシュは①斜面崩壊頭部を含む 1 メッシュとして数えた場合と、②メッシュの重心に崩壊地ポリゴンがかかる複数のメッシュを数えた場合としての頻度分布の比較、及び崩壊地ポリゴンがどのメッシュの重心にもかからない場合の崩壊メッシュの数え方における比較を行った。その結果、崩壊・非崩壊メッシュの分布はともに同様の傾向を示し、崩壊メッシュは非崩壊メッシュと比べ判別得点の正側にシフトしている結果が得られた。図 1.3 は崩壊頭部の崩壊メッシュ時と複数の崩壊メッシュ時における崩壊発生率の違いについてのグラフである（ここでも図 1.2 と同様に崩壊メッシュの

数え方における比較を行った)。崩壊頭部メッシュ時と複数メッシュ時とともに崩壊発生率は判別得点の増加に伴い大きくなる傾向であった。また、複数メッシュ時は頭部メッシュ時よりも崩壊発生率の立ち上がりは明確であった。このことから、崩壊地の複数メッシュ・頭部メッシュのどちらを使っても危険性を評価することは可能である。図 1.4 は六甲山系にある急傾斜地崩壊危険箇所における判別得点の頻度分布のグラフである。急傾斜地崩壊危険箇所は元々傾斜が急であるために、判別得点の値も正側でピークを迎えている。また急傾斜地崩壊危険箇所の中でも、実際に兵庫県南部地震で斜面崩壊した危険箇所の判別得点はピークよりも更に高い値に含まれている。上記の検討結果から急傾斜地崩壊危険箇所は降雨を誘因とする斜面崩壊に対しての危険箇所であるが、地震でも斜面崩壊が起こりやすく、判別得点の大きいところでより斜面崩壊が発生しやすいことが確認できた。なお、本検討において急傾斜地崩壊危険箇所の施設整備状況は考慮せず一律に評価を行っている。

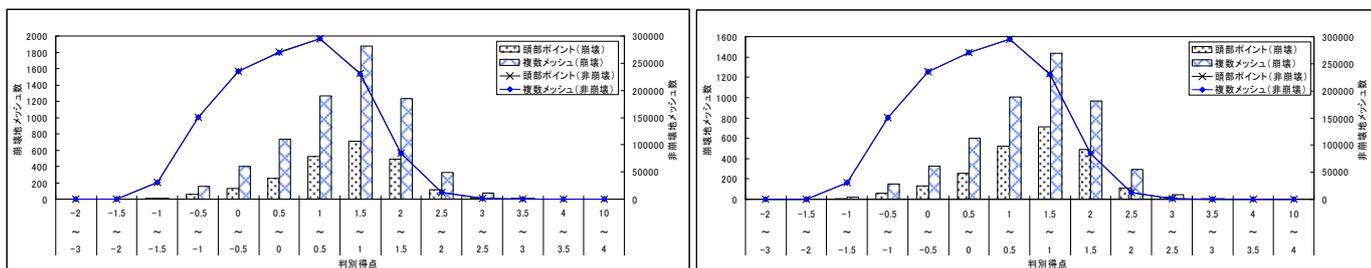


図 1.2 六甲山系全体の判別得点頻度分布図

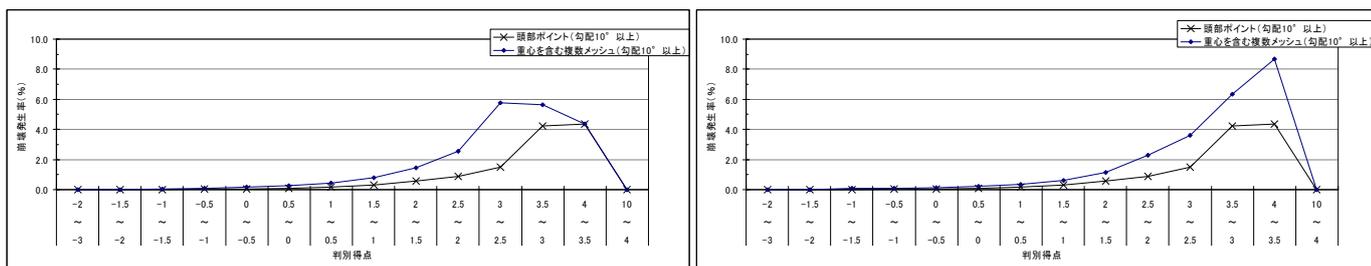


図 1.3 重心を含む複数メッシュと頭部メッシュの崩壊発生率の関係

* 図 1.2・1.3 において、左図は崩壊地ポリゴンがメッシュの重心を含まない時は崩壊頭部が含まれる 1 メッシュを崩壊メッシュとした場合であり、右図は崩壊地ポリゴンが重心にかかるメッシュのみを崩壊メッシュとした場合である。

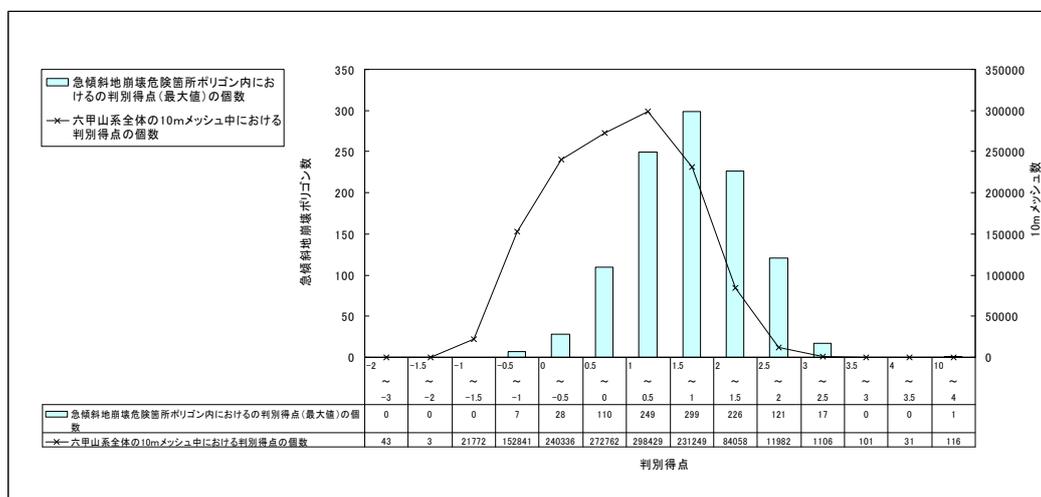


図 1.4 急傾斜地崩壊危険箇所における判別得点(平均値と最大値)の分布

1.3. 危険度評価作業のまとめ

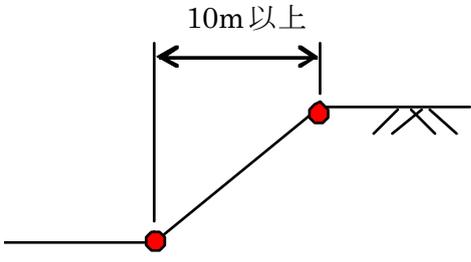
危険度評価作業の内容および課題等を、以下に整理した。

1.3.1. フロー別のまとめ

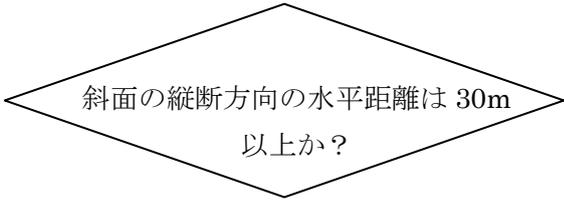
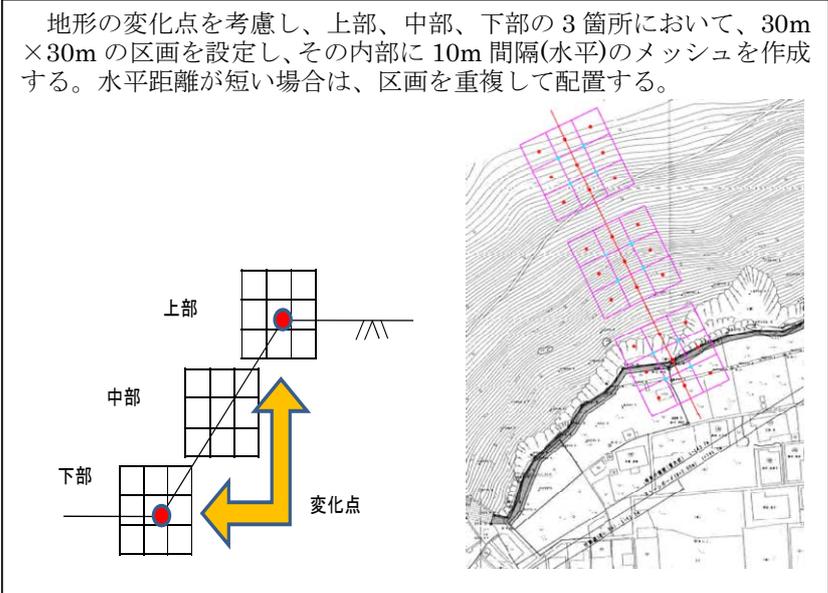
(1) 全体

評価フロー	まとめ
<p>(1)データの準備 次の基本データを準備する。 ①平面図(斜面の水平距離 10m 以上、縮尺 1/500~1/2000 程度) ②縦断図(代表断面) ③想定する地震の震源情報(位置、深さ、モーメントマグニチュード)または、評価地点における最大加速度 ④調査位置(緯度、経度) 以下の資料 (⑤~⑥) は準備可能であれば用意することが望ましい。 ⑤概況 (植生・湧水の状況等) ⑥地形・地質状況</p>	<ul style="list-style-type: none"> 平面図は、等高線の間隔が小さな物(1~2m 程度)が良い。(10m メッシュに対し、10m 間隔のコンターでは、誤差が大きくなる)。 緯度経度は、測地系(日本、世界)により、位置に違いが出る。このため、計算にあたっては測地系を統一することが必要である。 概況、地形地質状況は、斜面カルテ等があれば基本データは揃えることが可能である。
<p>(2) 評価を行う区画 (30m×30m) と区画内の 10m メッシュの作成 対象となる崩壊危険箇所の平面図を基に、斜面の傾斜方向に 30m×30m の区画を 2~3 箇所設定する。この区画は地形の変化点等を考慮して設定する。各区画内には 10m 間隔(水平)のメッシュを 9 個作成する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 評価する斜面の測線選定の基準を明確にしておくことが必要である。(例：最大傾斜、対策工施工位置、尾根地形であるなど。) ①区画の中心が指定区域内に入るように作成する。 ②区画の中心が地形の変化点と重なるように作成する。 ③区画の中心線が等高線と直交するように作成する。 ④急勾配となる位置で区画を作成する。既に斜面において 10mメッシュの標高データがある場合にはそのまま活用することもできる。
<p>(3)標高の読み取り 設定した 30m×30m の区画において、それぞれ平均曲率(9 点)と勾配(4 点)に対応する標高を読み取る。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 目視による読み取りの場合には、コンター間隔の 1/10 程度まで読み取りを行なう。 1 区画 (30m×30m) 当たりで 13 点の標高データを読み取る。
<p>(4) 評価パラメータの算出 (3)のデータから、斜面勾配と平均曲率を算出する。次に、距離減衰式を用いて最大地震加速度を算出する場合、震源位置から崩壊危険箇所の位置までの斜距離を算出し、震源までの斜距離とモーメントマグニチュードを用いて最大地震加速度を算出する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 斜面勾配と平均曲率の算出には別添の「斜面勾配・平均曲率の簡易計算プログラム」を活用してもよい。
<p>(5)判別得点の算出 斜面勾配、平均曲率、最大地震加速度のデータを用いて、各区画 (30m×30m) の判別得点を算出し、判別得点の最大値を用いて危険度評価を行なう。各メッシュの判別得点及び判別得点の最大値を表形式で整理する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 判別得点の算出および危険度評価は、表計算ソフトの基本機能で対応可能である。
<p>(6)地震時の斜面崩壊危険度の評価 地震時の斜面崩壊危険度については、(5)の評価と、現地の状況から総合的に判断して決定する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 判別得点は相対的評価のため、現地の状況 (植生や湧水など) を踏まえて総合的に危険度を評価することが望ましい。

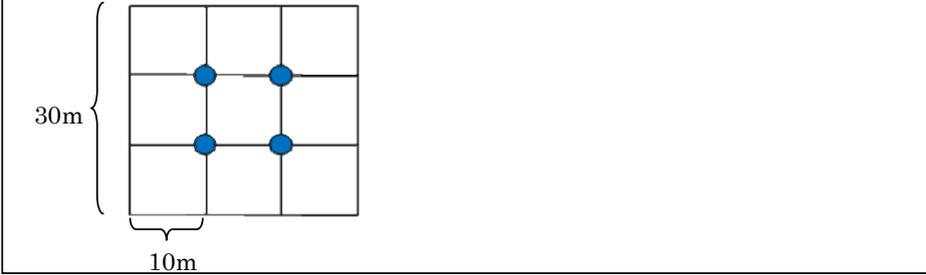
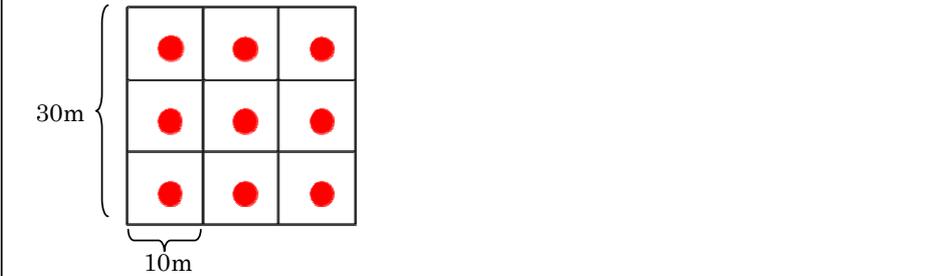
(2) データ準備

評価フロー	まとめ
<p>解析を実施する斜面について横断方向及び代表断面の斜面の水平距離が 10m 以上で、縮尺が 1/500~1/2000 程度の平面図のものを収集する。</p> 	<p>平面図は、等高線の間隔が小さなもの(1~2m 程度)が良い(10m メッシュに対し、10m 間隔のコンターでは、誤差が大きくなる)。</p> <p>既に斜面において 10m メッシュの標高データがある場合にはそのまま活用することもできる。</p>
<p>崩壊危険箇所の位置の緯度と経度を収集する。 箇所番号、都道府県、市町村、箇所名、位置を表形式で整理する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 緯度経度は、測地系(日本、世界)により、位置に違いが出る。このため、計算にあたっては測地系を統一することが必要である。 斜面カルテ等があれば基本データは揃えることが可能である。
<p>想定する地震の震源情報(震源位置の緯度と経度、震源の深さ、モーメントマグニチュード)あるいは、評価地点における最大地震加速度のデータを収集する。 断層番号、断層名、位置、震源の深さ、モーメントマグニチュードを表形式で整理する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 地域防災計画などを参考に、都道府県ごとに想定地震を設定する。

(3) 評価を行う区画 (30m×30m) と区画内の 10m メッシュの作成

評価フロー	まとめ
<div style="text-align: center;">  <p>斜面の縦断方向の水平距離は 30m 以上か？</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・斜面の水平距離が 30m 程度ないと、30m×30m の区画を 3 つ作成できない。 ・水平距離が短い場合、区画を重複して配置する。
<p>YES</p> <p>地形の変化点を考慮し、上部、中部、下部の 3 箇所において、30m×30m の区画を設定し、その内部に 10m 間隔(水平)のメッシュを作成する。水平距離が短い場合は、区画を重複して配置する。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・上部、下部の変化点を決定し、30m×30m の区画を設定した後に、その中心に中部の区画を置く。
<p>NO</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <p>地形の変化点を考慮し、上部、下部の 2 箇所において、30m×30m の区画を設定し、10m 間隔(水平)のメッシュを作成する。 水平距離が短い場合、区画を重複して配置する。</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・最低 10m の縦断および横断方向の斜面水平距離がないと、変化点に中心を置いた場合に、斜面上にその他の計測点が入らない(斜面形状を捉えられない)ため、水平距離が 10m に満たない斜面は評価できない。

(4) 標高の読み取り

評価フロー	まとめ
<p>斜面勾配に対応する標高は、評価を行う区画（30m×30m）中の10mメッシュの交点で4点読み取る。左上、右上、左下、右下の標高を表形式で整理する。（30m×30mの区画数は2～3箇所）</p> 	<p>30m×30mの1区画当たり4箇所（3区画設定した場合は12箇所）の標高データを読み取る。</p>
<p>平均曲率に対応する標高は、評価を行う区画（30m×30m）中の各10m×10mメッシュの中央で9点読み取る。左上、中上、右上、左中、中、右中、左下、中下、右下の標高を、表形式で整理する。（30m×30mの区画数は2～3箇所）</p> 	<p>30m×30mの1区画当たり9箇所（3区画設定した場合は27箇所）の標高データを読み取る。</p>

(5) 評価パラメータの算出

フロー	まとめ
<p>メッシュの交点から読み取った4点からの距離が最小となる平面と水平面がなす角(斜面勾配θ)を算出する。</p> $a_1x + b_1y + c_1z + d = 0$ $a_2x + b_2y + c_2z + d = 0$ $\theta = \cos^{-1} \frac{a_1a_2 + b_1b_2 + c_1c_2}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)}}$	<p>一次傾向面の勾配の算出は、行列計算で行なうことになり煩雑となるため、別添の「斜面勾配・平均曲率の簡易計算プログラム」を活用するのが便利である。</p>
<p>メッシュの中央から読み取った9点の標高データと平面座標データを用いて、偏微分方程式により平均曲率Hを算出する。</p> $H = \frac{h_{xx}(1+h_y^2) + h_{yy}(1+h_x^2) - 2h_xh_yh_{xy}}{2(1+h_x^2+h_y^2)^{\frac{3}{2}}}$ $h_x = \frac{\partial h}{\partial x} \quad h_y = \frac{\partial h}{\partial y} \quad h_{xx} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad h_{yy} = \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad h_{xy} = \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y}$ <p>ここに、H : 平均曲率 h : 標高</p>	<p>偏微分方程式を解くことになり煩雑となるため、別添の簡易計算プログラムを活用するのが便利である。</p>
<p>震源位置から崩壊危険箇所までの斜距離Rを算出する。</p> $R = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 + d^2}$ <p>ここに、R : 震源位置から崩壊危険箇所までの斜距離 x_1, y_1, z_1 : 崩壊危険箇所の位置の座標 x_2, y_2, z_2 : 震源位置の座標 d : 震源の深さ</p>	<p>崩壊危険箇所毎に複数の震源までの斜距離を算出することになる。これは表計算ソフトの基本機能で算出可能である。</p>
<p>④距離減衰式による最大地震加速度の計算の場合</p> <p>福島美光(2002)の距離減衰式および地盤補正により最大地震加速度Aを算出する。</p> $\log_{10} A_{org} = 0.42 M_w - \log_{10} (R + 0.025 \cdot 10^{0.42 M_w}) - 0.0033 R + 1.22$ $A = C \cdot A_{org}$ <p>ここに、A : 地震加速度 (cm/s²) R : ③で求めた震源位置から崩壊危険箇所までの斜距離 (km) M_w : モーメントマグニチュード C : 地盤補正係数</p>	<p>崩壊危険箇所毎に複数の震源に対応した最大地震加速度を算出することになる。表計算ソフトの基本機能で算出可能である。</p>
<p>斜面勾配、平均曲率、斜距離、最大地震加速度を表形式で整理する。</p>	<p>斜面の上部、中部、下部で勾配と平均距離が異なるため、3つの表に分けて整理する。</p>

(6) 判別得点の算出

フロー	まとめ																						
<p>斜面勾配、平均曲率、最大地震加速度のデータを用いて、斜面の上部～下部に設定した区画の判別得点 F を算出する。震源が複数存在する場合、最大地震加速度は最大値を用いる。</p> $F = 0.075I - 8.9c + 0.0056A - 3.2$ <p>ここに、F : 判別得点 I : 斜面勾配 (°) c : 平均曲率 A : 最大地震加速度 (cm/s²)</p>	<p>最大地震加速度の最大値の抽出や判別得点の算出は、表計算ソフトの基本機能で可能である。</p>																						
<p>上部～下部の判別得点と判別得点の最大値を表形式で整理する。</p>	<p>整理は、表計算ソフトの基本機能で可能である。</p>																						
<p>判別得点の最大値を用いて、危険度評価基準(5区分)により、崩壊危険箇所の崩壊発生の予測を行なう。</p> <table border="1" data-bbox="185 936 1078 1111"> <thead> <tr> <th>危険度</th> <th>色</th> <th>表現</th> <th>判別得点</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>低い</td> <td>青</td> <td>崩壊が起こりにくい</td> <td>-3.0~1.5</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">↑ ↓</td> <td>水色</td> <td>崩壊がやや起こりにくい</td> <td>-1.5~-0.5</td> </tr> <tr> <td>緑</td> <td>—</td> <td>-0.5~0.5</td> </tr> <tr> <td>黄色</td> <td>崩壊がやや起こりやすい</td> <td>0.5~1.0</td> </tr> <tr> <td>高い</td> <td>赤</td> <td>崩壊が起こりやすい</td> <td>1.0~10</td> </tr> </tbody> </table>	危険度	色	表現	判別得点	低い	青	崩壊が起こりにくい	-3.0~1.5	↑ ↓	水色	崩壊がやや起こりにくい	-1.5~-0.5	緑	—	-0.5~0.5	黄色	崩壊がやや起こりやすい	0.5~1.0	高い	赤	崩壊が起こりやすい	1.0~10	<p>区分は、表計算ソフトの基本機能で可能である。</p>
危険度	色	表現	判別得点																				
低い	青	崩壊が起こりにくい	-3.0~1.5																				
↑ ↓	水色	崩壊がやや起こりにくい	-1.5~-0.5																				
	緑	—	-0.5~0.5																				
	黄色	崩壊がやや起こりやすい	0.5~1.0																				
高い	赤	崩壊が起こりやすい	1.0~10																				

1.3.2. メッシュ作成が困難な事例

縮尺不明の図面は、メッシュ作成が不可能である。また、コンター間隔が大きなもの（10m コンターなど）はメッシュ作成は可能であるが、メッシュ作成者により大きな誤差がでたり、実際の斜面形状に合わないデータになり問題となる場合がある。以下に、メッシュ作成に問題がある事例を整理した。

(1) コンターがないため標高が読み取れない例

住宅地図のような地域で、標高は各所にあるものの、コンターがなく斜面として取りにくい、または取れない例。

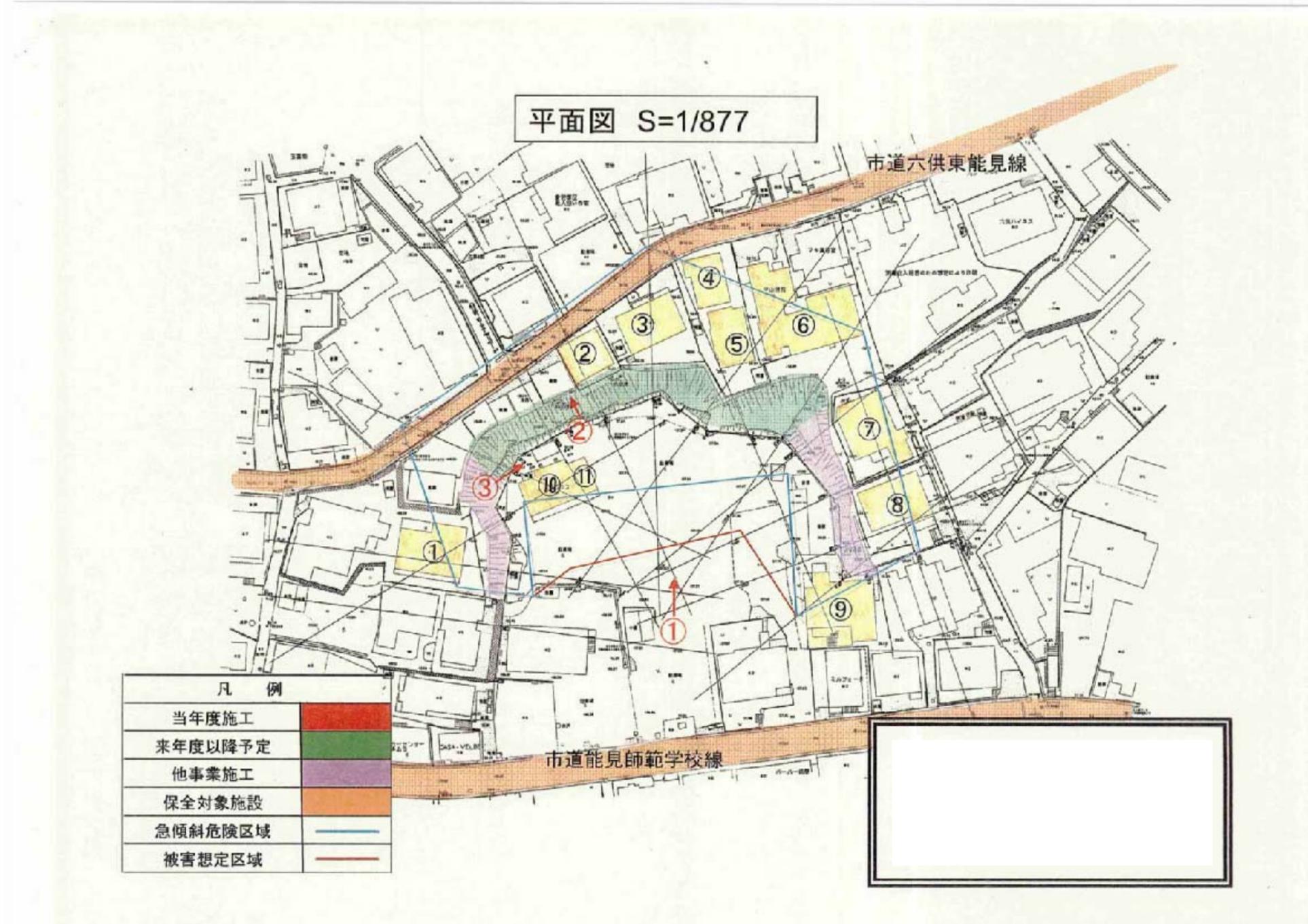


図 1.5 コンターがないため標高が読み取れない例

(2) メッシュの取り方により勾配が大きく変わる例

棚田地形のため、メッシュの取り方により勾配が大きく変わる。また、実際の斜面勾配に合わないデータとなる例。

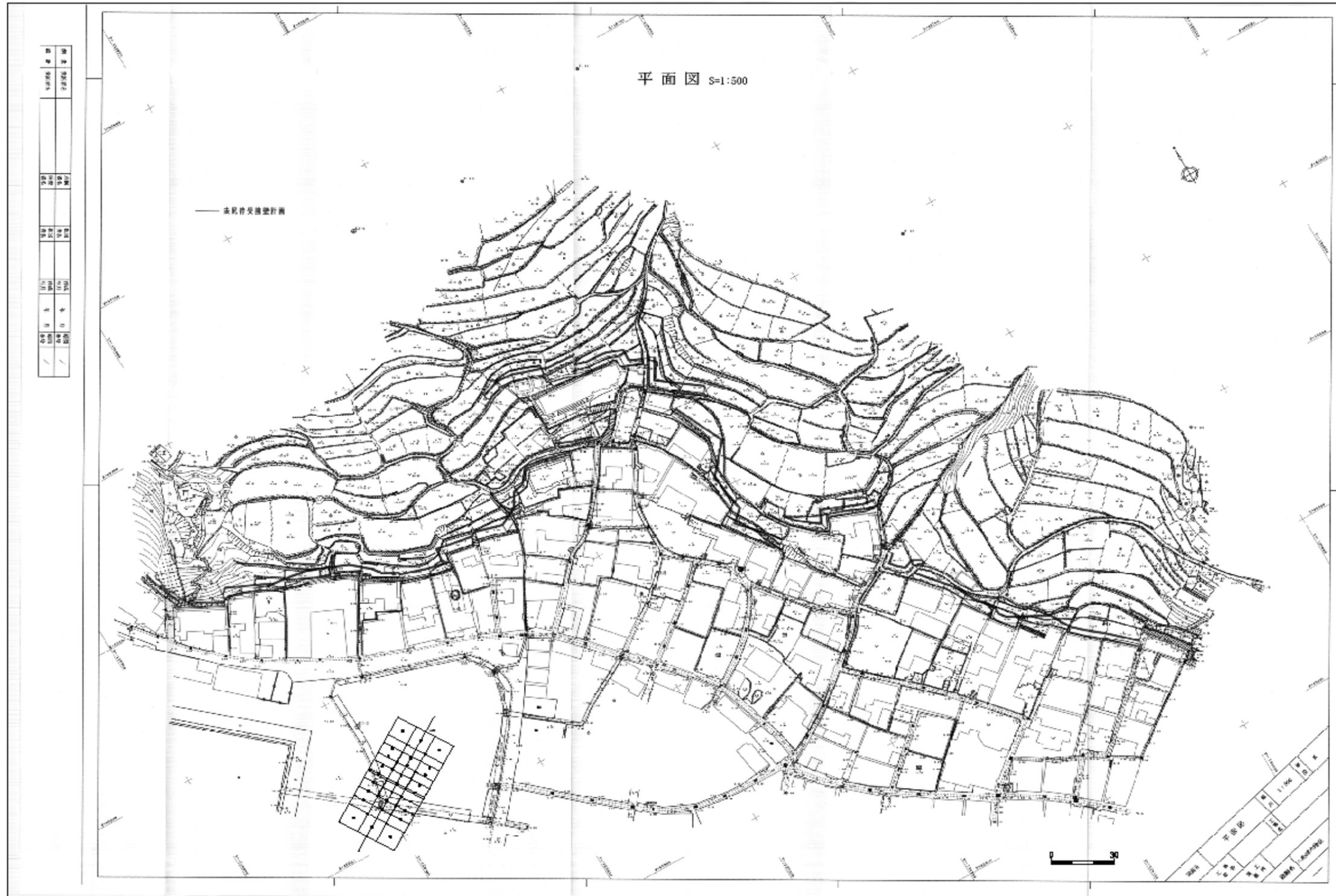


図 1.6 メッシュの取り方により勾配が大きく変わる例

(3) 斜面距離が短く、メッシュが取れない例

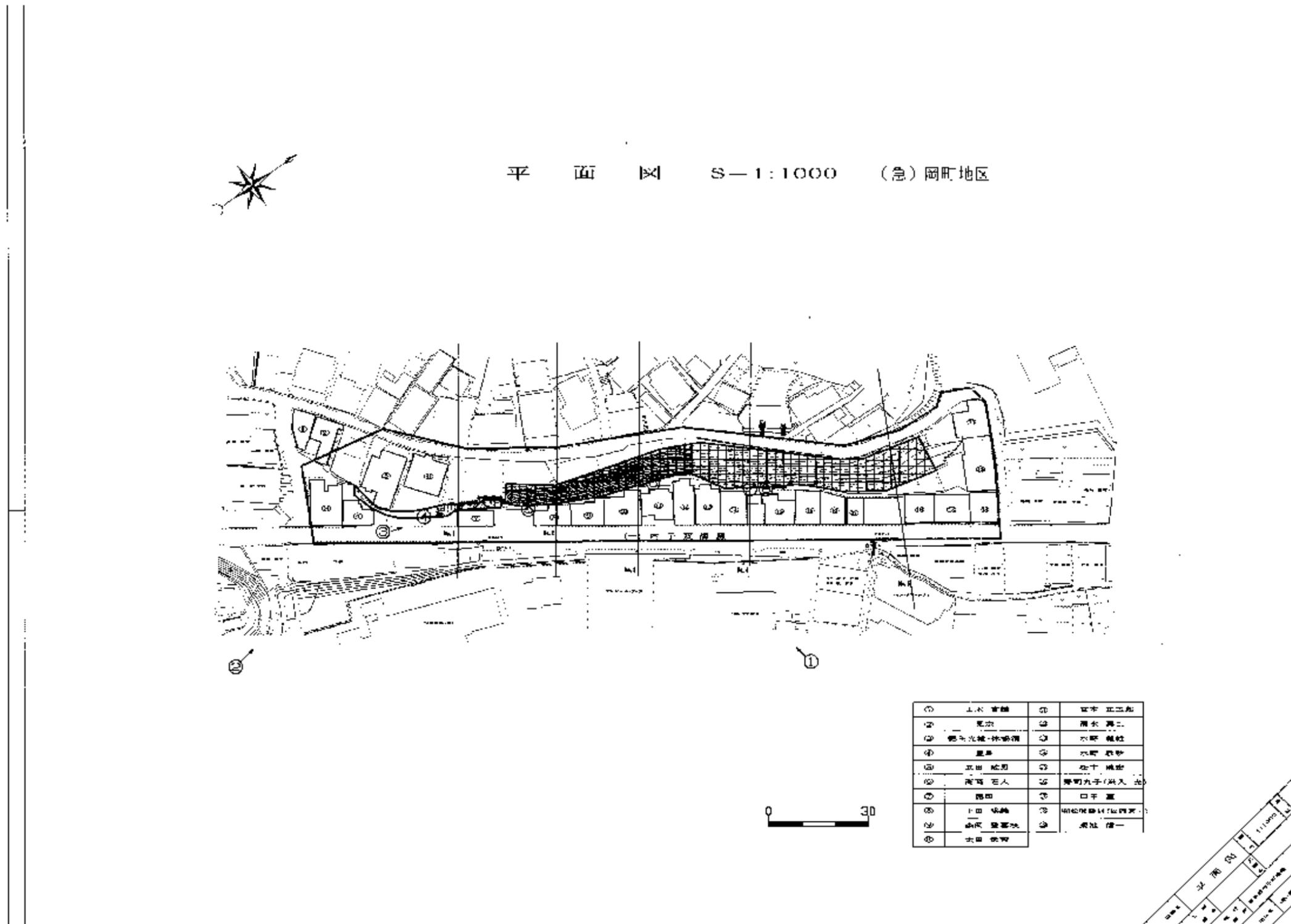


図 1.7 斜面距離が短くメッシュが取れない例

(4) 図面作成のミスにより、実際の標高・勾配が確認できない例
 図面作成のミス。コンター間隔と標高表示に誤差があるために、実際の標高・勾配が確認できない例。

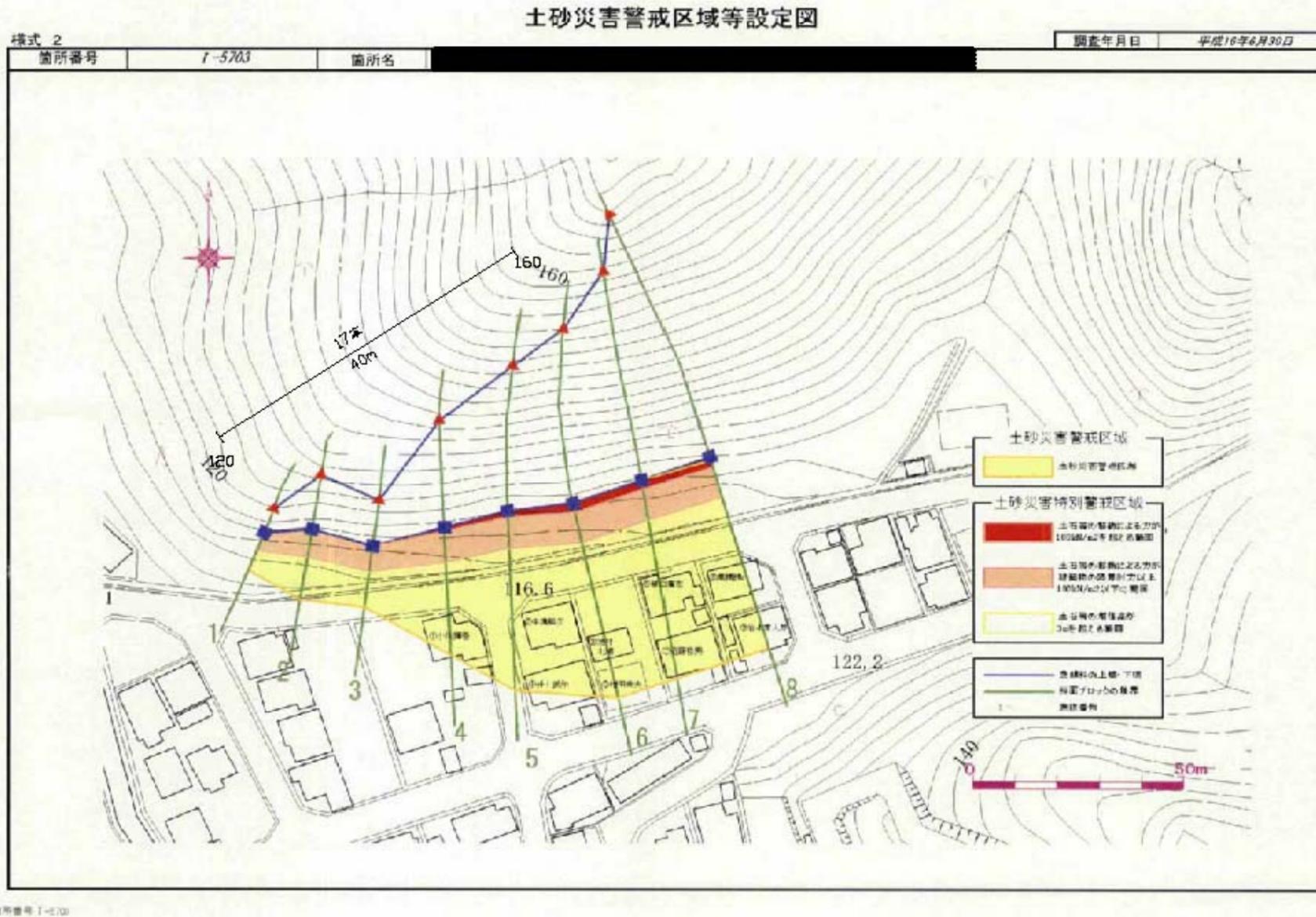


図 1.8 図面作成のミスにより、実際の標高・勾配が確認できない例